

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/DE05/000080

International filing date: 21 January 2005 (21.01.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE  
Number: 10 2004 005 363.4  
Filing date: 03 February 2004 (03.02.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 23 March 2005 (23.03.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

# BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

DE05 | 80



## Prioritätsbescheinigung über die Einreichung einer Patentanmeldung

**Aktenzeichen:** 10 2004 005 363.4

**Anmeldetag:** 03. Februar 2004

**Anmelder/Inhaber:** Forschungszentrum Jülich GmbH,  
52428 Jülich/DE

**Bezeichnung:** Halbleiter-Struktur

**IPC:** H 01 L 29/778

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 14. März 2005  
Deutsches Patent- und Markenamt

Der Präsident  
Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, which appears to read "Wallner", is written over a stylized, wavy line that serves as a flourish or underline for the title "Der Präsident Im Auftrag".

Wallner



## Beschreibung

## Halbleiter-Struktur

Die Erfindung betrifft eine Halbleiter-Struktur.

In der Halbleiter-Elektronik werden Bauelemente mit immer kürzeren Schaltzeiten und geringerem Leistungsbedarf gewünscht. Der Weg dahin führt über Mikrostrukturen aus Halbleitermaterialien mit möglichst kurzen Wegen für die Elektronen zwischen Injektions- und Extraktionspunkt (Kanallängen) und hohen Beweglichkeiten, das heißt mit guter Response auf äußere elektrische Felder.

10 Im Labor werden Standardwerte für sogenannte High Electron Mobility Transistoren (HEMT) bei Kanallängen  $< 1 \mu\text{m}$  mit Beweglichkeiten  $\mu_e > 10^6 \text{ cm}^2 / \text{V*s}$  und Schaltzeiten  $< 10 \text{ ps}$  erreicht. In einem HEMT werden mehrere gut definierte Schichten aus verschiedenen Halbleitermaterialien, z. B. aus GaAs und AlGaAs mit Dicken im Bereich von Nanometern, das heißt bis hinunter zu einigen Atomlagen, und definiert dotiert mit verschiedenen elektrisch aktiven Fremdatomen hergestellt. Diese Schichten sind in der Ebene lateral auf Bruchteile von  $\mu\text{m}$  strukturiert.

15 Im HEMT ist das Prinzip der Modulationsdotierung für zwei-dimensionale Halbleiterheterostrukturen genutzt. Dabei wird durch eine einseitig planar epitaktisch aufgewachsene Halbleiterheterostruktur eine räumliche Trennung von dotiertem Halbleitermaterial und dem undotierten Halbleitermaterial des Transistorkanals, in dem

· sich an der Grenzfläche ein steuerbares zweidimensionales Ladungsträgergas, z. B. in Form eines Leitungsband-Elektronengases ausbildet, erzielt. Durch die Trennung von Kanal und Dotierstörstellen wird eine 5 stark erhöhte Beweglichkeit des Ladungsträgergases ermöglicht.

Im HEMT stellt sich in einer Schicht mit einer kleinen Bandlücke an der Grenzfläche zu einer zweiten Schicht mit einer großen Bandlücke eine hohe Konzentration von 10 Ladungsträgern ein, die parallel zur Grenzfläche eine hohe Beweglichkeit haben, während sie in der dritten Dimension auf einen Bereich von z. B. 10 Nanometer an der Grenzfläche eingeschränkt bleiben.

Ein Quantentopf ist eine Struktur, die für die Kri- 15 stallelektronen in eine Raumrichtung als Potentialtopf mit einer Ausdehnung vergleichbar der De-Broglie-Wellenlänge wirkt. Bei den meisten Halbleitern ist dies bei Abmessungen von einigen 10 Nanometern oder weniger 20 erfüllt. Es bildet sich ein sogenanntes, quasizweidimensionales Elektronengas aus. Die Ladungsträger bleiben in x- und in y-Richtung frei beweglich, entlang der z-Achse sind die Energiedifferenzen quantisiert.

Die hohen Anforderungen an die Perfektion derartiger Schichten und Bereiche in Nanostrukturen können durch 25 Hetero-Epitaxie, z. B. in einer Molekularstrahl-Epitaxie-Anlage, erfüllt werden. Mit solchen Verfahren werden die Strukturen zur Ausbildung eines zweidimensionalen Elektronengases hergestellt.

Wenn die Abmessungen der Leiterbahnen in die Größenordnung der Fermiwellen kommen, werden die möglichen Elektronenbahnen eingeschränkt. Dann bekommt die Quantenmechanik wegen des Wellencharakters der Elektronen einen wesentlichen Einfluss auf die stationären Zustände und auf den Transport der Elektronen.

5

Wird die Dimension eines zweidimensionalen Elektronengases durch laterale Strukturierung weiter eingeschränkt, werden eindimensionale oder sogar null-dimensionale, das heißt in jeder Raumrichtung eingeschränkte Systeme, sogenannte Quantendots, realisiert.

10

Aus dem Stand der Technik sind Verfahren zur Herstellung von Strukturen bekannt, in denen die freien Elektronen oder Löcher in bestimmten Raumrichtungen auf Nanometerbereiche eingeschränkt sind.

15

Derartige Bauelemente, die auf ein- oder null-dimensionalen Halbleiterstrukturen basieren, sind aufgrund quantenmechanischer Effekte vielversprechende Systeme für verbesserte Transistor- und Dioden-Bauelemente und neuartige Quanten-Nano-Bauelemente. Die Dimensionsreduktion in zwei bzw. drei Raumrichtungen zu, in Bezug auf die Ladungsträger-Beweglichkeit, ein- bzw. null-dimensionalen Strukturen, basiert auf der Quantisierung der eingeschränkten Freiheitsgrade der freien Ladungsträger. Dazu muss die de-Broglie-Wellenlänge des Ladungsträgers, also des Kristall-Elektrons oder des Kristall-Lochs von der Größenordnung der Abmessungen der eingeschränkten Raumrichtungen sein.

Forschungszentrum Jülich GmbH  
PT 1.2123/mo-

03.02.2004

6

4

Aus Björk et al. (Björk, M.T., Ohlsson, B.J., Sass, T., Persson, A.I., Thelander, C., Magnusson, M.H., Deppert, K., Wallenberg, L.R., Samuelson, L. (2002), One-dimensional heterostructures in semiconductor nanowhiskers. Applied Physics Letters 80, 1058) ist epitaktisches und teilweise selbstorganisiertes Wachstum von ein-dimensionalen Halbleiterheterostrukturen, sogenannten Whiskern bekannt.

Aus Pannev et al. (Pannev, N., Persson, A.I., Sköld, N., L. Samuelson (2003), Sharp exciton emission from single InAs Quantum dots in GaAs nanowires. Applied Physics Letters 83, 2238) ist bekannt, Ladungsträger aus einem GaAs-Substrat in eine InAs-Insel über einen nanowire aus GaAs zu transportieren und Lumineszenz zu erzeugen.

Nachteilig zeigen diese Strukturen eine schlecht steuerbare Ladungsträger-Konzentrationen im Quantendot.

Aufgabe der Erfindung ist es, eine einfach aufgebaute Halbleiter-Struktur bereit zu stellen, mit der eine hohe Konzentration freier Ladungsträger eingestellt und deren räumlicher Verlauf in einem null- oder eindimensionalen Quantentopf gezielt gesteuert werden kann.

Die Aufgabe wird durch eine Halbleiter-Struktur gemäß Hauptanspruch gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den darauf rückbezogenen Patentansprüchen.

Forschungszentrum Jülich GmbH  
PT 1.2123/mo-

03.02.2004

5

Erfindungsgemäß weist die Halbleiter-Struktur mindestens einen ersten Materialbereich und einen zweiten Materialbereich auf. Der zweite Materialbereich umschließt den ersten Materialbereich und ist epitaktisch auf dem ersten Materialbereich angeordnet. In der Halbleiter-Struktur liegt Fermi-Level-Pinning an der, der Grenzfläche beider Materialbereiche gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Außenfläche vor, wodurch der erste Materialbereich einen Quantentopf für freie Ladungsträger ausbildet.

10 Vorteilhaft ist der Quantentopf durch Fermi-Level-Pinning nicht gestört.

Der erste Materialbereich bildet einen Quantentopf für freie Ladungsträger aus, so dass diese quantenmechanisch null- oder ein-dimensional in ihrer Freiheit eingeschränkt sind, bzw. die Zustände für Ladungsträger liegen 0-d oder 1-d vor.

15 Dadurch wird vorteilhaft bewirkt, dass im Quantentopf des ersten innen angeordneten Materialbereichs eine hohe Konzentration und Beweglichkeit an Ladungsträgern vorliegt, ohne dass dieser Materialbereich hoch dotiert sein muss. Im Gegensatz zum Stand der Technik ist besonders vorteilhaft ein-dimensionaler Ladungsträger-Transport im ersten Materialbereich bzw. Quantentopf gezielt einstellbar, was zur Herstellung von Transistoren mit hoher Ladungsträger-Beweglichkeit genutzt werden kann.

20 25 Neben ein-dimensionalen Quantenstrukturen, wie Whiskern und lithographisch hergestellten Mesastrukturen, sind

besonders vorteilhaft auch Inseln ohne Fermi-Level-Pinning an der Grenzfläche des Quantentopfes herstellbar. Die Whisker können mit weiteren Heterostrukturen ausgebildet werden, z. B. mit GaAs / AlGaAs- oder GaN / AlGaN-Bereichen als verarmte Strukturen.

Damit ist vorteilhaft gewährleistet, dass die positiven Eigenschaften dieser Halbleiter-Strukturen auch in räumlich übergeordneten Strukturen bis hin zu Lasern und Transistoren ausgenutzt werden.

Das energetische Minimum des Quantentopfes des ersten Materialbereichs liegt entweder unterhalb der Fermi-Energie im Gleichgewicht, oder aber weist einen Abstand kleiner gleich  $k_B T$  zur Fermi-Energie auf. Dann ist vorteilhaft gewährleistet, dass genügend Ladungsträger im Quantentopf sind und für Transistoren, Dioden und so weiter genutzt werden können.

Die Abmessung bzw. der Durchmesser des ersten Materialbereichs sind so klein, dass die Ladungsträgerbeweglichkeit in mindestens zwei Raumrichtungen quantenmechanisch eingeschränkt ist.

Der erste Materialbereich ist so zum zweiten Materialbereich angeordnet, bzw. ist von diesem so umwachsen, dass das unerwünschte Fermi-Level-Pinning von der Grenzfläche der beiden Materialbereiche, zu der dieser Grenzfläche gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Außenfläche, des zweiten Materialbereichs verschoben ist. Das Fermi-Level-Pinning tritt dann an der nicht epitaktischen Außenfläche des zweiten Materialbereichs zu gegebenenfalls weiteren Materialbereichen auf. Sind wei-

Forschungszentrum Jülich GmbH  
PT 1.2123/mo-

03.02.2004

9

7

tere epitaktische Grenzflächen am zweiten Materialbereich angeordnet, so tritt Fermi-Level-Pinning an der ersten nicht epitaktischen Außenfläche auf.

In der Halbleiter-Struktur soll der kürzeste Abstand  
5 des Quantentopfes vom Mittelpunkt aus zur nicht epitaktischen Außenfläche, an der das Fermi-Level-Pinning vorliegt, dabei großenteils die Verarmungslänge  $d$  nicht unterschreiten. Eine Definition der Verarmungslänge kann Lüth (Lüth H (1996). Surfaces and interfaces  
10 of solid materials. 3rd edition, Springer Study Edition, Seite 458) entnommen werden. Die Verarmungslänge ist eine dotierungsabhängige Materialgröße.  
Dadurch wird vorteilhaft bewirkt, dass die Konzentration  
15 freier Ladungsträger und ihres räumlichen Verlaufes in derartigen ein- und null-dimensionalen Halbleiter-Strukturen mit Hilfe einer lateralen epitaktischen Umwachsung gegebenenfalls mit Dotierung und / oder Grenzflächen-Polarisationsladungen eingestellt und gesteuert werden kann. Aus Dotieratomen des zweiten Materialbereichs können Ladungsträger in den ersten Materialbereich gelangen. Ein oder mehrere optionale äußere Gates können die Ladungsträger-Konzentration im ersten Materialbereich steuern, ohne dass das unerwünschte Fermi-Level-Pinning an der Grenzfläche des ersten zum zweiten  
20 Materialbereich diese beeinflusst.  
25

Die nicht epitaktischen Grenz- oder Außenflächen der Halbleiter-Struktur zeigen Fermi-Level-Pinning aufgrund von Grenzflächenzuständen. Je nach energetischer Position des Fermi-Level-Pinnings der Struktur, ergeben  
30 sich zwei Fälle: Die Verarmung oder die Anreicherung

freier Ladungsträger im Halbleiter nahe der Grenzfläche. Dieser Umstand wird im Rahmen der Erfindung für die Ladungsträger-Konzentration im Quantentopf genutzt. Das gemäß Stand der Technik an der Grenzfläche zwischen zwei Materialbereichen vorhandene Fermi-Level-Pinning wird auf Grund geeigneter Wahl der Materialien oder der Abmessungen und / oder gegebenenfalls der Dotierung der beiden Materialbereiche an die erste nicht-epitaktisch ausgebildete Grenzfläche eines äußeren Materialbereichs verschoben und hat somit keinen oder zumindest weniger Einfluss auf die Ladungsträger-Konzentration und Beweglichkeit im Quantentopf des ersten Materialbereichs. Dies wird zur Steuerung der Ladungsträger-Konzentration in dem Quantentopf mittels Elektroden genutzt.

Für die Klasse der grenzflächenverarmten Halbleiter mit GaAs, InP, oder GaN als Materialien für den ersten Materialbereich ist die Konzentration freier Ladungsträger in daraus hergestellten Bauelementen, insbesondere mit Durchmessern in der Größenordnung der Verarmungslänge und kleiner, verschwindend gering und praktisch nicht beeinflussbar durch externe Größen, wie z. B. Elektroden. Auch zu hohe Dotierungen können auf Grund des negativen Einflusses auf die Ladungsträger-Beweglichkeit und auf die Steuerung nicht verwendet werden. Eine solche verarmte Struktur ist für elektronische Bauelemente unbrauchbar.

Es wurde weiterhin erkannt, dass für die Klasse der grenzflächenangereicherten Halbleiter mit z. B. InAs, InSb, und anderen sogenannten narrow-gap Materialien für den ersten Materialbereich die Konzentration freier Ladungsträger räumlich nahe der Grenzfläche zwischen

erstem und zweiten Materialbereich praktisch unveränderlich ist und eine Materialgröße darstellt. Die freien Ladungsträger liefern metallähnliche Eigenschaften, insbesondere elektronische Transporteigenschaften und optische Response. Sie sind praktisch nicht beeinflussbar durch Dotierung und / oder externe Größen, wie z. B. Elektroden. In Bauelementen aus grenzflächenangereicherten Materialien, insbesondere mit Abmessungen in der Größenordnung der Anreicherungslänge, werden die elektronischen Eigenschaften praktisch durch die freien Ladungsträger nahe der Grenzfläche dominiert und sind somit unveränderbar. Eine solche Struktur ist für elektronische Transistor-Bauelemente mit Steuerelektroden ebenfalls unbrauchbar.

Die gegebenenfalls dotierten Materialien und / oder die Dicke der beiden Materialbereiche in der Halbleiterstruktur werden erfindungsgemäß zur Ausbildung eines gezielt mit Ladungsträgern versorgten ersten Materialbereichs so ausgewählt, dass das Fermi-Level-Pinning von der Grenzfläche an die der Grenzfläche gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Grenzfläche des zweiten Materialbereichs verschoben ist. Gegebenenfalls ist mindestens ein weiterer epitaktisch oder nicht epitaktisch angeordneter Materialbereich auf dem zweiten Materialbereich angeordnet.

In dem Fall, dass dieser weitere Materialbereich epitaktisch auf dem zweiten Materialbereich angeordnet ist, bildet er vorteilhaft einen beständigen Abschluss der Halbleiter-Struktur, bevor weitere Schichten z. B. mit Gate-Funktion angeordnet werden.

Das Material des weiteren Materialbereichs kann zwecks Passivierung der Halbleiter-Struktur identisch zum Material des ersten Materialbereichs sein.

5 Die Halbleiter-Struktur kann auch ein Metall als Material für den weiteren Materialbereich umfassen.

Der erste Materialbereich weist in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung eine Abmessung bzw. einen Durchmesser von kleiner 100 Nanometern, insbesondere eine von 0,5 bis 50 Nanometern, auf.

10 Eine Halbleiter-Struktur mit derartigen Abmessungen des ersten Materialbereichs sind gemäß Stand der Technik besonders anfällig gegenüber Fermi-Level-Pinning und können hier erstmalig mit hoher Ladungsträger-Konzentration bereit gestellt werden.

15 Als eine besonders vorteilhafte Halbleiter-Struktur ist GaAs als Material für den ersten Materialbereich und / oder AlGaAs als Material für den zweiten Materialbereich vorgesehen. Diese Materialien sind wegen der quasi-Gitteranpassung epitaktisch gut miteinander in Verbindung zu bringen und dann praktisch versetzungsfrei zueinander angeordnet. Ohne Einschränkung der Erfindung können aber andere Halbleiter-Strukturen mit derartig gitterangepassten Materialbereichen verwendet werden.

20 Der zweite Materialbereich kann durch Dotierung ein beliebiges auch inhomogenes Dotierprofil aufweisen. Es ist aber auch möglich Polarisationsladungen an der Grenzfläche zwischen dem ersten und dem zweiten Materialbereich zur Optimierung des Ladungsträgerprofils im Quantentopf zu nutzen. Die Polarisationsladungen werden

03.02.2004

Forschungszentrum Jülich GmbH  
PT 1.2123/mo-

11

13

abhängig von der kristallographischen Ausrichtung der Grenzflächenbereiche in Beziehung zu den Achsen des Gesamtkristalls genutzt, so dass Dotierungen im zweiten Materialbereich auch vermieden werden können.

5 Der zweite Materialbereich kann mehrere, schellenartig und epitaktisch zueinander angeordnete Flächen aufweisen. Der zweite Materialbereich kann z. B. von der Grenzfläche zum ersten Materialbereich aus GaAs ausgehend, aus einer Abfolge von 20 Nanometer dicken Bereichen aus  $Al_{0,3}Ga_{0,7}As$ , AlAs und  $Al_{0,51}Ga_{0,49}As$  bestehen.

10 Ein dünner, undotierter oder niedrig dotierter Spacer schließt den zweiten Materialbereich nach außen ab. Der Spacer verringert die Streuung von Ladungsträgern innerhalb des ersten Materialbereichs. Der erste Materialbereich aus GaAs wird von dieser Abfolge umschlossen. Der erste Materialbereich kann hingegen in Längsrichtung, also senkrecht zum zweiten Materialbereich Heterostrukturen aufweisen.

15 20 Der erste und der zweite Materialbereich können somit beliebig durch gesondert abgreifbare Heterostrukturen unterbrochen sein. Dadurch sind z. B. resonante Tunneldioden herstellbar.

25 Der erste Materialbereich der Halbleiter-Struktur soll bei geringer lateraler Ausdehnung von beispielsweise weniger als 50 Nanometern eine Ladungsträger-Konzentration von mindestens  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , insbesondere eine Ladungsträger-Konzentration von mindestens  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  aufweisen. Es können ein oder mehrere Gates zur Steuerung der Ladungsträger-Konzentration angeordnet sein.

Im weiteren wird die Erfindung an Hand von Ausführungsbeispielen und der beigefügten Figuren näher beschrieben.

Fig. 1 zeigt einen Ausschnitt des elektronischen Banderschemas für eine Halbleiter-Struktur gemäß Stand der Technik. Die Leitungsbandkante (E) für Elektronen ist als Funktion der radialen Position  $x$  innerhalb einer großen und daher nur partiell verarmten Struktur wiegegeben. Der Fall der Valenzbandkante für Löcher ist 5 analog. Diese Bandkante ist Potential für Ladungsträger.

Der Abstand  $a$  sei gemäß Stand der Technik groß und gibt die Abmessung eines ersten Materialbereichs 1 an, auf dem nicht epitaktisch ein zweiter Materialbereich 3 (nicht dargestellt), z. B. ein Metall, Gas oder Kunststoff oder sonstiger Isolator oder Halbleiter angeordnet ist. Der Abstand  $d$  ist die Verarmungslänge ausgehend vom Fermi-Level-Pinning der Grenzfläche 2 des betrachteten Halbleiters. Bei partiell verarmter Struktur 10 ist  $d \ll a$  und daher relativ unschädlich für den Ladungsträgertransport in der Grenzfläche 2 zwischen beiden Materialbereichen. Die verarmten Bereiche des Materialbereichs 1 weisen aufgrund  $d \ll a$  nur einen kleinen Anteil an der Gesamtstruktur auf. An der nicht epitaktischen Grenzfläche tritt aufgrund von Grenzflächenzusänden das Fermi-Level-Pinning mit einer energetischen 15 Größe gemäß des Pfeils 5 auf.

Die Fermienergie (=Fermi-Level) im Gleichgewicht ist durch die Punkt-Strich-Linie 4 dargestellt. Der energetische

tische Wert des Fermi-Level-Pinnings, ist gemäß Pfeil 5 ein fixierter, energetischer Abstand von der Leitungsbandkante an der Stelle der Grenzfläche 2 aufgrund von Grenzflächenzuständen.

5 Fig. 2 zeigt eine weitere Leitungsbandkante E für Elektronen in einer Halbleiter-Struktur als Funktion der radialen Position x. Hier ist die Abmessung von Materialbereich 1 im Vergleich zu der Halbleiter-Struktur der Fig. 1 sehr klein gewählt und Materialbereich 1 ist daher komplett verarmt. Der Fall der Valenzbandkante für Löcher ist analog. Diese Bandkante ist Potential für Ladungsträger.

10 Der Abstand a stellt erneut die räumlichen Abmessungen von Materialbereich 1 dar (z. B. 20 Nanometer). Auf Materialbereich 1 ist der Materialbereich 3 (nicht dargestellt) nicht epitaktisch angeordnet. Der Materialbereich 3 besteht z. B. aus einem Metall oder einem Gas, Kunststoff oder sonstigem Isolator oder Halbleiter.

15 Der Abstand d stellt wiederum die Verarmungslänge dar. In diesem Fall ist die Verarmungslänge d größer als die Abmessungen a des Materialbereichs 1. Das Potentialminimum des ausgebildeten Quantentopfes ist durch Pfeil 6 dargestellt. Das Potentialminimum liegt aufgrund  $d > a$  energetisch weit oberhalb zu  $k_B T$  ( $T$ =Temperatur,  $k_B T$ =Boltzmann-Konstante) der Fermienergie im Gleichgewicht, dargestellt durch die Punkt-Strich-Linie 4. Die Grenzfläche 2 zwischen Materialbereich 1 und Materialbereich 3 ist daher vollständig verarmt. Die Grenzfläche 2 weist aufgrund von Grenzflächenzuständen Fermi-

Level-Pinning (siehe Pfeil 5) auf. Pfeil 5 gibt das energetische Niveau des Fermi-Level-Pinnings wieder. Es wird deutlich, dass ein fixierter, energetischer Abstand der Leitungsbandkante an der Stelle der Grenzfläche 2 aufgrund von Grenzflächenzuständen vorliegt.

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, dass für die Klasse grenzflächenverarmter Halbleiter gemäß Stand der Technik, wie z. B. GaAs, InP und GaN, frei oder auf einem Substrat, die Konzentration freier Ladungsträger in daraus hergestellten Bauelementen, insbesondere mit Abmessungen kleiner 100 Nanometern und in der Größenordnung der Verarmungslänge und kleiner, sehr gering und praktisch nicht beeinflussbar durch externe Größen, wie z.B. Elektroden ist. Die Verarmungslänge ist zwar eine dotierungsabhängige Materialgröße. Allerdings kann bei derartigen Abmessungen auch mit hoher Dotierung in GaAs als Material für die erste Schicht auf Grund der dann auftretenden starken Störstellenstreuung mit schlechter Beweglichkeit der Ladungsträger kein brauchbarer Transistor / Tunneldiode hergestellt werden.

Simulationen zeigen, dass trotz hoher Dotierung praktisch eine vollständig verarmte Struktur diesen Typs bestehen bleibt. Es tritt immer Fermi-Level-Pinning an der Grenzfläche 2 bei etwa 0,65 eV gegen die Leitungsbandkante E auf, so dass die Halbleiter-Struktur aus Materialbereich 1 (30 Nanometer GaAs, n-dotiert mit  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) und Materialbereich 3 (Metall, Luft und so weiter) vollständig verarmt ist (T=300K).

Fig. 3 zeigt die Leitungsbandkante (E) als Funktion der radialen Position (x) innerhalb einer erfindungsgemäßen Halbleiter-Struktur. In Fig. 3 ist schematisch die Leitungsbandkante E entlang des Querschnitts einer erfindungsgemäßen ein-dimensionalen Halbleiter-Struktur dargestellt. Ein Querschnitt der Materialbereiche ist schematisch der Fig. 4 entnehmbar.

Die Halbleiter-Struktur umfasst einen ersten Materialbereich 1 mit der Abmessung a, welcher von einem zweiten Materialbereich 3 epitaktisch umwachsen ist. Materialbereich 1 ist eine Insel oder ein Whisker. Der Materialbereich 3 ist epitaktisch auf dem Materialbereich 1 angeordnet. Der Fall der Valenzbandkante für Löcher ist analog. Diese Bandkante ist ein Potential für Ladungsträger.

Die Materialien beider Bereiche 1, 3 werden so gewählt, dass das Material des ersten Materialbereichs 1 den Quantentopf ausbildet. Der Quantentopf liegt auf dem Niveau der Fermi-Energie 8, dessen energetisches Niveau durch die Punkt-Strich-Linie angedeutet ist. An der Grenzfläche 2 zwischen dem ersten Materialbereich 1 und dem epitaktisch hierzu angeordneten Materialbereich 3 ist die Leitungsbandkante E abgesenkt im Vergleich zum Materialbereich 3.

Es tritt ein Potentialsprung an der Heterointerface-Grenzfläche 2 auf (Band-Diskontinuität). An der Grenzfläche 2 tritt aber kein Fermi-Level-Pinning auf, wie gemäß Stand der Technik, sondern vielmehr an der ersten nicht epitaktischen Grenzfläche 6 zwischen zweitem Ma-

03.02.2004

Forschungszentrum Jülich GmbH  
PT 1.2123/mo-

16

terialbereich 3 und einem optional auf diesem angeordneten, gegebenenfalls Materialbereich 3 umwachsenden weiteren Materialbereich 5, welches als cap-Material der Halbleiter-Struktur fungiert. Der optional angeordnete Materialbereich 5 dient der Passivierung der dadurch umwachsenen Halbleiter-Struktur. In dem Fall, dass Schicht 5 nicht epitaktisch auf Schicht 3 angeordnet ist, läge das Fermi-Level-Pinning an der Grenzfläche 4.

Die Grenzfläche 6 der Halbleiterstruktur weist Fermi-Level-Pinning aufgrund von Grenzflächenzuständen auf. Die gesamte Halbleiter-Struktur wird von einem nicht epitaktischen Material, z. B. einem Isolator 7 oder einem Metall 7 oder einem nicht epitaktischen Halbleiter 7 umgeben. Als Isolator kann z. B. ein Gas wie Luft oder Kunststoff vorliegen.

Der energetische Wert des Fermi-Level-Pinnings, dargestellt durch Pfeil 9, und damit der Abstand des an der Grenzfläche 6 fixierten energetischen Abstands der Leitungsbandkante E vom Fermi-Level 8 im Gleichgewicht ist durch die Pfeile 9 dargestellt.

Wie ersichtlich, ist das an der Grenzfläche 6 auftretende Fermi-Level-Pinning durch geeignete Wahl der Materialien von Schichten 1 und 3, den Abmessungen dieser Schichten und gegebenenfalls deren Dotierungen so weit von der Grenzfläche 2 entfernt, dass die von Grenzfläche 6 ausgehende Verarmungslänge d den Quantentopf nicht negativ beeinflusst, so dass Ladungen gezielt in diesen Bereich eingebracht werden können. In der Halb-

leiter-Struktur soll der kürzeste Abstand des Quantentopfes zur nicht epitaktischen Außenfläche 6 (Fermi-Level-Pinning) dabei größenordnungsmäßig die Verarbeitungslänge  $d$  nicht unterschreiten.

5 Fig. 4 zeigt einen Ausschnitt eines radial geschnittenen Querschnitts durch einen gemäß Fig. 3 umwachsenen Whiskers. Der innere Materialbereich 1, wird epitaktisch vollständig von Materialbereich 3 umwachsen. Es kann optional cap-Material 5 epitaktisch auf Material-  
10 bereich 3, und auf dem cap-Material 5 optional metallisches Schottky-Gate-Material 7 angeordnet sein. Auch die übrigen Bezugszeichen entsprechen denen der Fig. 3.

Als erfindungsgemäße Halbleiter-Strukturen kommen insbesondere GaAs als Material von Bereich 1 und AlGaAs  
15 als Material von Bereich 3 in Frage.

Eine Simulation (Fig. 5) zu den beiden Halbleiter-Strukturen gemäß der Fig. 3, 4 demonstriert die erfindungsgemäße Wirkungsweise der lateralen epitaktischen Umwachsung und die gegenüber dem Stand der Technik deutlich erhöhte freie Ladungsträger-Konzentration im Inneren der Struktur, das heißt im Quantentopf von Materialbereich 1. Die Abmessung der Umwachsung und deren Dotierung sind so gewählt, dass die freien Ladungsträger zur Erhöhung der Beweglichkeit im Inneren maximiert sind, räumlich getrennt von Dotierung und Grenzflächen.  
20 Eine erfindungsgemäße Änderung der Materialien und / oder Materialdicken und / oder Dotierungen ermöglicht eine definierte Variation der freien Ladungsträgerkonzentration und / oder räumlichen Verteilung.  
25

In Fig. 5 ist eine näherungsweise Simulation zu einem zwei-dimensionalen Schichtpaket mit selbstkonsistentem Hartree-Potential, LDA-Austausch, und quantenmechanischer Berechnung der Elektronenladungen (freie Ladungsträger) gezeigt.

Simuliert wurde der Fall eines undotierten, 20 Nanometer dicken Materialbereichs 1 aus GaAs, der von einem 15 Nanometer dicken Materialbereich 3 aus  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  vollständig umwachsen war. Materialbereich 3 ist n-dotiert mit  $3,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und vollständig ionisiert. Ein undotierter, 5 nm dicker Materialbereich 5 aus GaAs ist zum Schutz gegen Oxidation des Al in Materialbereich 3 auf diesem angeordnet. Der Materialbereich 5 ist an ein nicht epitaktisches metallisches Außenmaterial 7 (z. B. Schottkykontakt) angeordnet.

Die Fermienergie ist erneut strichpunktiert dargestellt. Im oberen Diagramm a) ist der Verlauf der Leitungsbandkante (Potential) als Funktion der Position (z) dargestellt. Im unteren Diagramm b) ist der Verlauf der freien Ladungsträgerkonzentration (Charge) als Funktion der Position (z) dargestellt. Es tritt Fermi-Level-Pinning erst an der Grenzfläche 6 bei etwa 0,65 eV gegen Leitungsbandkante E auf (s. Fig. 4). Es wurde nur der rechte Teil mit Bezugszeichen 1 bis 7 versehen.

Es wird deutlich, dass im Bereich des Materialbereichs 1 eine gezielte Ladungsträger-Konzentration in Höhe von bis zu  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  erreicht wird. Dies ist ein Wert, der um etwa  $10^9$  höher liegt, als bisher bekannt. Diese Anreicherung von Ladungsträgern im Materialbereich 1 mit

Abmessungen von 20 Nanometern und kleiner kann je nach Anwendungsfall für optische Zwecke (null-dimensionale Ummwachsung einer Insel), Transistoren oder resonante Tunneldioden oder Superlattices (ein-dimensionale Ummwachsung von Whisker-Strukturen) oder andere Stack-Strukturen innerhalb eines Whiskers mit mehreren Transistoren und Gates und / oder Heterostrukturen innerhalb des Whiskers genutzt werden.

An Stelle der beschriebenen GaAs-AlGaAs-Halbleiter-Struktur kann ohne jegliche Einschränkung der Erfindung eine Halbleiter-Struktur aus den nachfolgend genannten Materialien verwendet werden.

- $Al_yGa_{1-y}As$  (Materialbereich 1) und  $Al_xGa_{1-x}As$  (Materialbereich 3), mit  $x > y$  zur Ausbildung der Stufe im Quantentopf (Banddiskontinuität);
- $InP$  (Materialbereich 1) und  $In_xAl_{1-x}As$ , mit einem Wert  $x$ , der eine Gitteranpassung an  $InP$  ermöglicht;
- $In_xGa_{1-x}As$  (Materialbereich 1) und  $InP$  (Materialbereich 3), mit einem Wert  $x$ , der eine Gitteranpassung an  $InP$  ermöglicht;
- $Al_yGa_{1-y}N$  (Materialbereich 1) und  $Al_xGa_{1-x}N$ , mit  $x > y$ ;
- $Si$  (Materialbereich 1 oder 3) und  $Si_xGe_{1-x}$  (Materialbereich 1 oder 3), je nach Kristallverspannung und ob Elektronen oder Löcher gewünscht sind;

- ZnO (Materialbereich 1) und  $Al_xGa_{1-x}N$  (Materialbereich 3);
- InAs (Materialbereich 1) und AlSb (Materialbereich 3).

5 Die Halbleiter-Strukturen können sowohl Verarmungs- als auch Anreicherungsstrukturen darstellen.

Fig. 6a, b zeigen schematisch in Perspektive die typische Geometrie der betrachteten ein- und null-dimensionalen Strukturen. Die konkrete geometrische Formgebung (z. B. rund, quadratisch, hexagonal) in den Figuren ist nur zur Veranschaulichung gewählt und allgemein nicht eingeschränkt. Fig. 6a zeigt schematisch den null-dimensionalen Fall der Umwachsung einer Insel mit innerem Materialbereich 1 und äußerem Materialbereich 2. Fig. 6b zeigt schematisch den ein-dimensionalen Fall der Umwachsung eines Whiskers mit innerem Materialbereich 1 und äußerem Materialbereich 2.

## P a t e n t a n s p r ü c h e

---

1. Halbleiter-Struktur aus mindestens einem ersten Materialbereich (1) und einem zweiten Materialbereich (3), wobei der zweite Materialbereich (3) den ersten Materialbereich (1) epitaktisch umschließt und eine Grenzfläche (2) ausbildet,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
die Materialien des ersten und zweiten Materialbereichs (1, 3) und / oder deren Abmessungen und / oder deren Dotierungen so beschaffen sind, dass ein Fermi-Level-Pinning (9) an der, der Grenzfläche (2) beider Materialbereiche (1, 3) gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Grenzfläche (4) des zweiten Materialbereichs (3) vorliegt und der erste Materialbereich (1) einen Quantentopf für freie Ladungsträger ausbildet.
2. Halbleiter-Struktur aus mindestens einem ersten Materialbereich (1) und einem zweiten Materialbereich (3), wobei der zweite Materialbereich (3) den ersten Materialbereich (1) epitaktisch umschließt und eine Grenzfläche (2) ausbildet,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
ein Fermi-Level-Pinning (9) an der, der Grenzfläche (2) beider Materialbereiche (1, 3) gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Grenzfläche (4) des zweiten Materialbereichs (3) vorliegt und der erste Materialbereich (1) einen Quantentopf für freie Ladungsträger ausbildet.

3. Halbleiter-Struktur nach Anspruch 2,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
das Fermi-Level-Pinning (9) durch Wahl des Materials  
und / oder der Abmessung und / oder der Dotierung  
und / oder des Dotierprofils einer oder beider Mate-  
rialbereiche (1, 3) bestimmt wird.
4. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden  
Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
auf dem zweiten Materialbereich (3) ein weiterer Ma-  
terialbereich (5) epitaktisch angeordnet ist, so  
dass Fermi-Level-Pinning erst an der, der epitakti-  
schen Grenzfläche (4) zwischen zweitem und weiterem  
Materialbereich (3, 5) gegenüberliegenden nicht epi-  
taktischen Grenzfläche (6) vorliegt.
5. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden  
Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
der erste Materialbereich (1) eine Abmessung a in x-  
Position von kleiner 100 Nanometern, insbesondere  
von 0,5 bis 50 Nanometern, aufweist.
6. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden  
Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass  
der kürzeste Abstand des Quantentopfes zur nicht  
epitaktischen Grenzfläche (4, 6), an der das Fermi-  
Level-Pinning vorliegt, die Verarmungslänge d nicht  
unterschreitet.

7. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
gekennzeichnet durch ein Material für den weiteren Materialbereich (5),  
5 das identisch ist zu dem Material des ersten Materialbereichs (1).

8. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
gekennzeichnet durch 10 ein Metall als Material für den weitere Materialbereich (5).

9. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
dadurch gekennzeichnet, dass 15 die Materialien des ersten und zweiten Materialbereichs (1, 3) quasi-Gitteranpassung zeigen und versetzungsfrei zueinander angeordnet sind.

10. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
gekennzeichnet durch 20  $Al_yGa_{1-y}As$  und  $Al_xGa_{1-x}As$  als Materialien für den ersten bzw. zweiten Materialbereich (1, 3), mit  $x > y$  zur Ausbildung einer Stufe im Quantentopf (Banddiskontinuität).

25 11. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
bei der im ersten Materialbereich (1) eine Konzentration freier Ladungsträger von mindestens  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , insbesondere von mindestens  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  vorliegt.

26  
03.02.2004Forschungszentrum Jülich GmbH  
PT 1.2123/mo-

24

12. Halbleiter-Struktur nach einem der vorhergehenden

Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet, dass

diese zumindest teilweise Metall- (Schottky) -

5 Elektroden (7) mit Gate-Funktion zur Steuerung der  
Ladungsträger umfasst.

13. Transistor, Laser, resonante Tunneldiode oder an-

dere Heterostruktur umfassend eine Halbleiter-

Struktur nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1

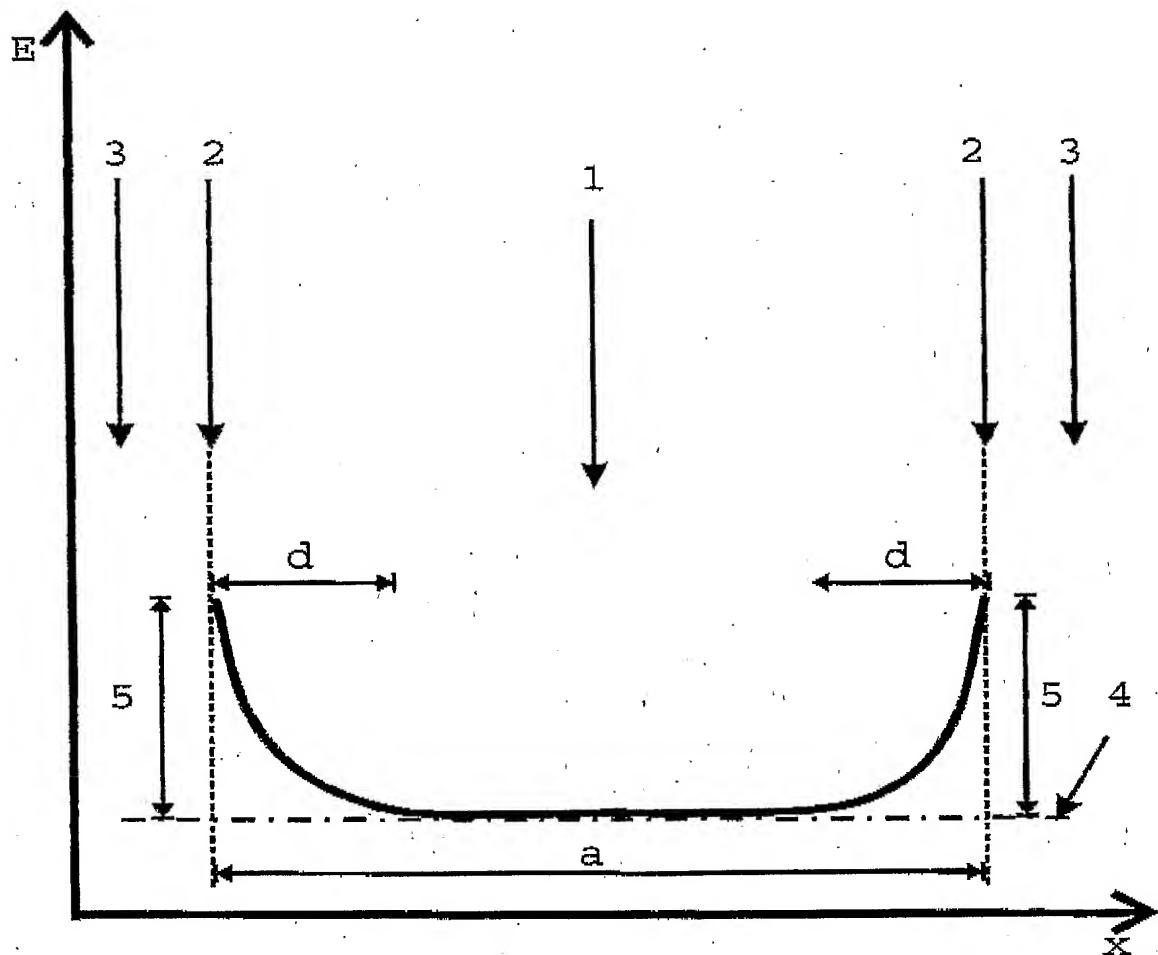
10 bis 12.

## Z u s a m m e n f a s s u n g

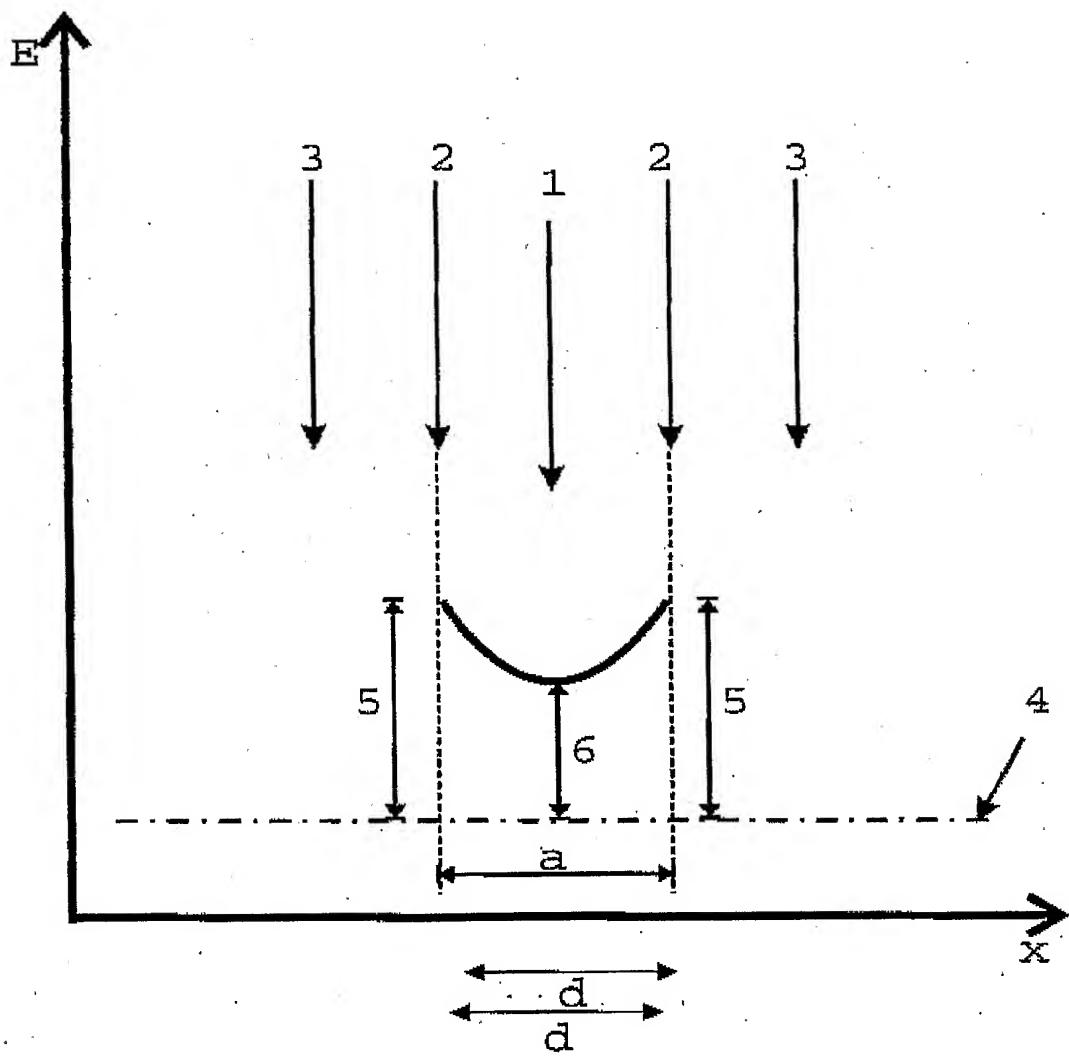
## Halbleiter-Struktur

Die Erfindung betrifft eine Halbleiter-Struktur.

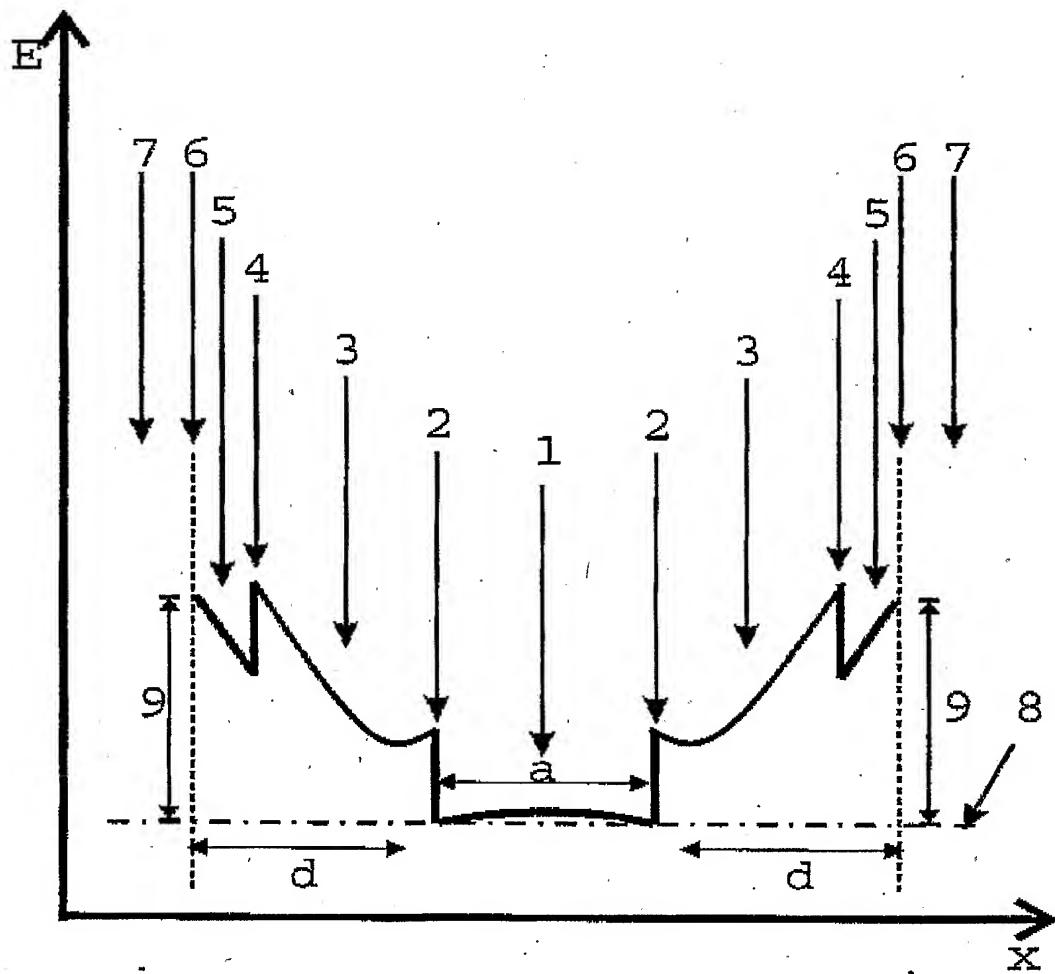
Die Halbleiter-Struktur weist mindestens einen ersten Materialbereich und einen zweiten Materialbereich auf, wobei der zweite Materialbereich den ersten Materialbereich epitaktisch umschließt und eine Grenzfläche ausbildet. Die Struktur ist dadurch gekennzeichnet, dass Fermi-Level-Pinning an der, der Grenzfläche beider Materialbereiche gegenüberliegenden, nicht epitaktischen Grenzfläche des zweiten Materialbereichs vorliegt und der erste Materialbereich einen Quantentopf für freie Ladungsträger ausbildet. Dadurch wird vorteilhaft bewirkt, dass eine steuerbare Ladungsträger-Konzentration im Quantentopf eingestellt werden kann.



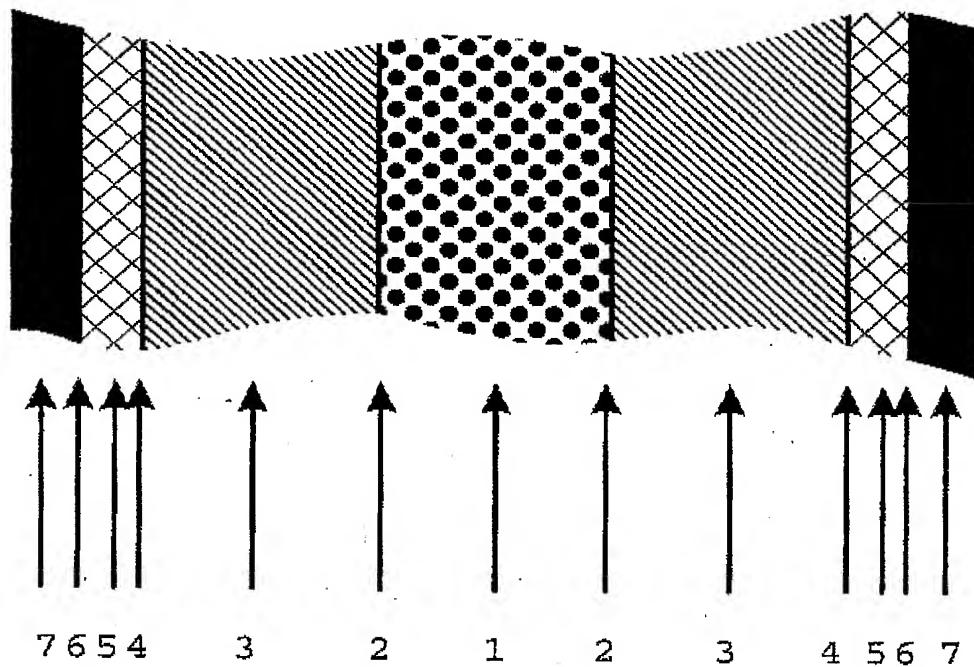
Figur 1 (Stand der Technik)



Figur 2 (Stand der Technik)



Figur 3



Figur 4

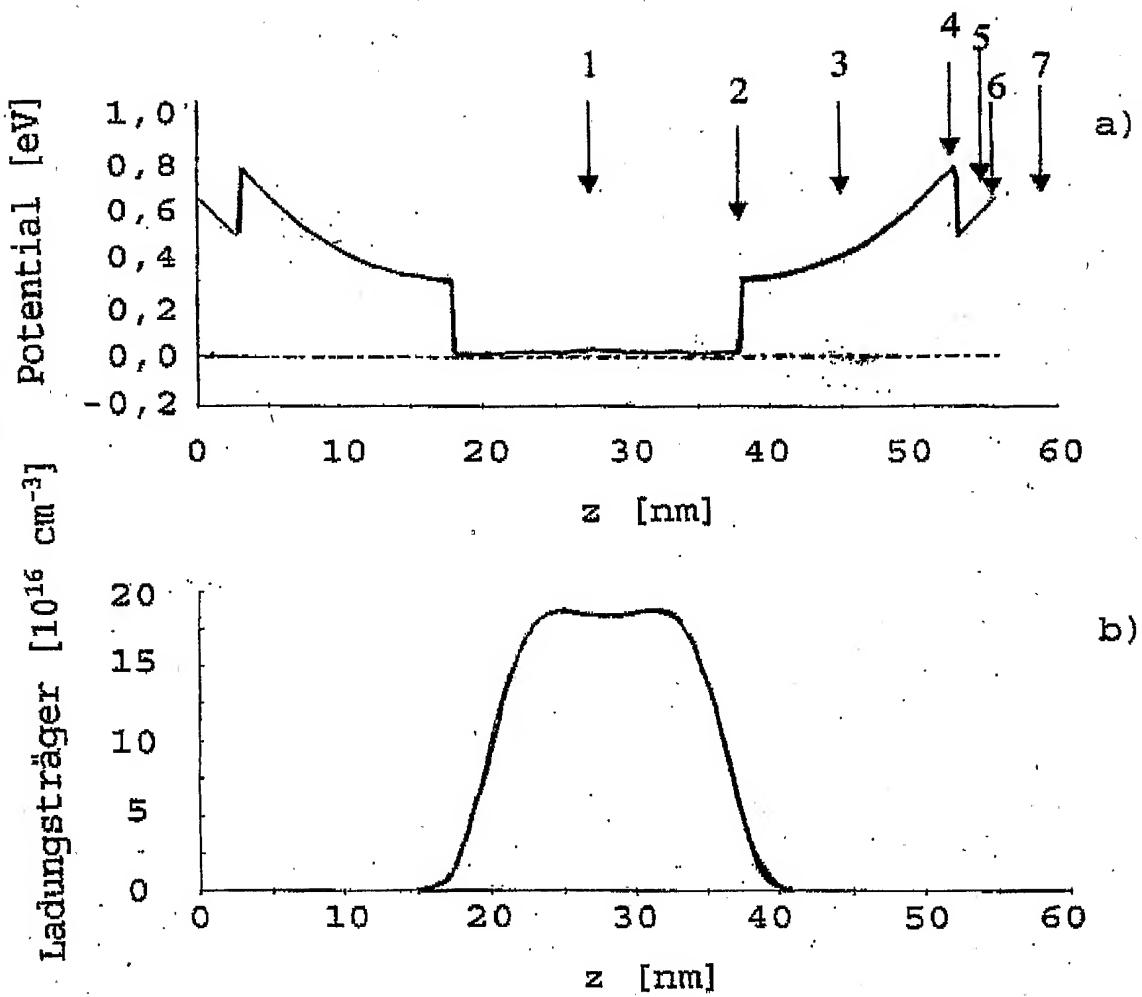
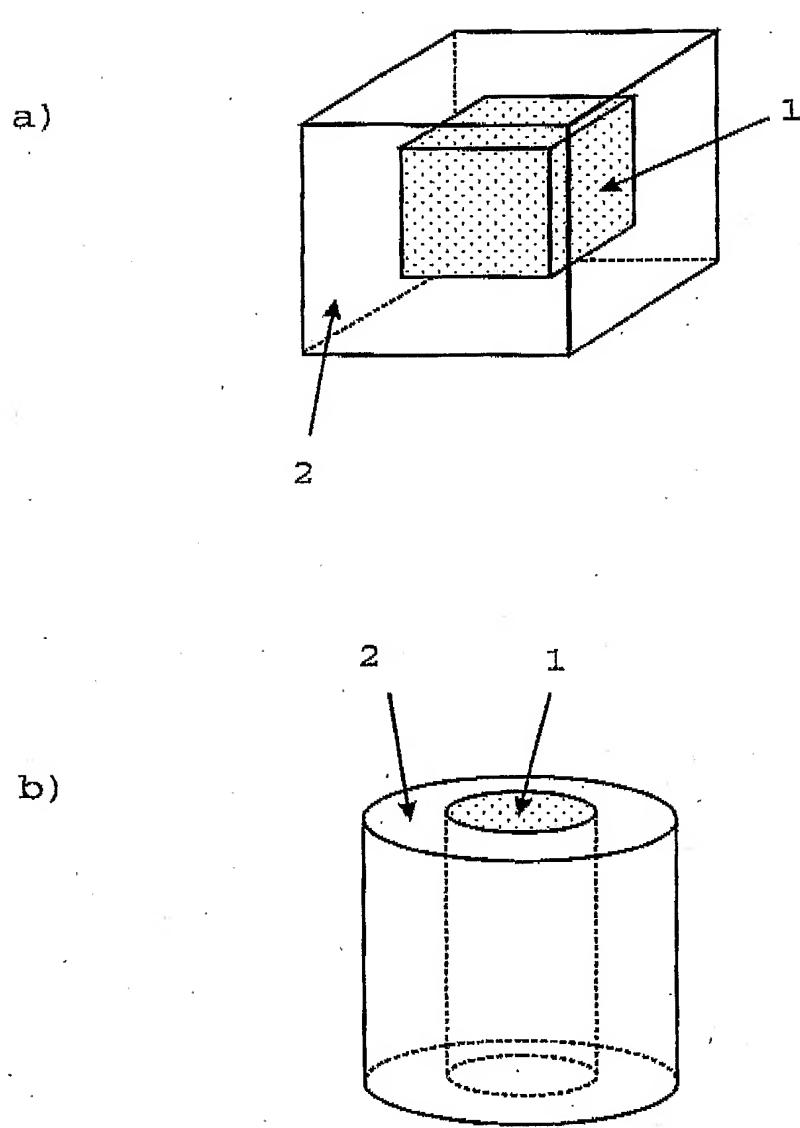


Figure 5



Figur 6